

# 高温超電導バルク体を用いた磁気浮上型免震装置に関する基礎研究

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 佐々木 修平  |
| 号      | 57  |
| 学位授与機関 | Tohoku University   |
| 学位授与番号 | 工博第4768号  |
| URL    | <a href="http://hdl.handle.net/10097/61593">http://hdl.handle.net/10097/61593</a> |

|             |  |
|-------------|--|
| 氏 名         | ささき しゅうへい<br>佐々木 修平                              |
| 授 与 学 位     | 博士 (工学)  |
| 学位授与年月日     | 平成25年3月27日                                       |
| 学位授与の根拠法規   | 学位規則第4条第1項                                       |
| 研究科, 専攻の名称  | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻                    |
| 学 位 論 文 題 目 | 高温超電導バルク体を用いた磁気浮上型免震装置に関する基礎研究                   |
| 指 導 教 員     | 東北大学 津田 理 教授                                     |
| 論 文 審 査 委 員 | 主査 東北大学 津田 理 教授<br>東北大学 一ノ倉 理 教授<br>東北大学 安藤 晃 教授 |

## 論 文 内 容 要 旨

近年, 地震の被害を最小限に抑える免震技術が注目されており, 東北地方太平洋沖地震では免震装置により被害を抑制できたとの報告がなされているが, 小規模地震に対して免震対象物の重量が軽い場合には免震効果が小さいこと, 長周期地震に対して共振を招くこと, 地震後においてもゆっくりとした揺れが長い時間続くなど, 既存の免震装置には依然として様々な課題が残されたままである。中でも特に問題なのが, 長周期地震に対する共振現象である。既存の免震装置は地震動の揺れを長周期化することによって振動伝達を抑制しているが, 近い将来に発生することが予想されている東海地震などの巨大地震では, 地震動の周期が長くなり, 地震被害を拡大させる恐れがある。そこで, 本研究では, 免震対象物を超電導バルク体によって磁気浮上させ, 振動源との物理的接触を無くした磁気浮上型の免震装置を提案し, 浮上力特性, 浮上安定性, 水平振動および鉛直振動に対する振動伝達特性など, 磁気浮上型超電導免震装置の基礎特性について検討した。

高温超電導バルク体 (以下では「バルク体」と称す) は冷却時 (着磁時) に鎖交する磁束密度を捕捉することができ, 異なる磁束密度分布にバルク体を変位させようとするとき, 捕捉した磁束密度分布に戻るようバルク体に復元力が働く磁気特性を有している。このバルク体の磁束のピン留め効果の性質を利用して免震対象物を磁気浮上させ, 振動発生源と免震対象物との物理的繋がりを無くし (絶縁し), 免震対象物への任意の水平振動伝達を排除 (抑制) するシステムが磁気浮上型超電導免震装置 (以下では「超電導免震装置」と称す) である。超電導免震装置は, 図1に示すように, バルク体と永久磁石 (レール) から構成されており, 水平方向の振動を二方向成分に分解することにより任意の水平振動伝達を排除させるため, 三層構造を採用している。これより, 図1において, 第1層に印加される $x$ 方向振動は, 第2層, 第3層には伝達せず, また, 第1層に印加される $y$ 方向振動は, 第2層には伝達するものの, 第3層には伝達しないため, 第1層に印加される任意の水平振動に対して, 第3層への振動伝達抑制が可能となる。

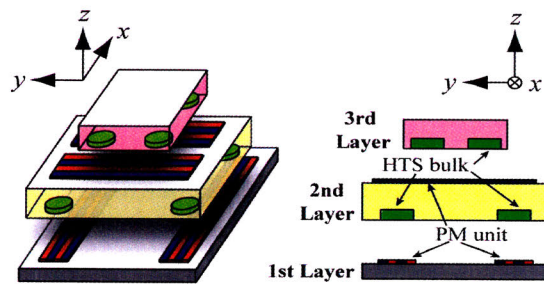


図 1 磁気浮上型超電導免震装置

Fig.1. Schematic drawing of a magnetic levitation type superconducting seismic isolation device.

超電導免震装置の実用化には、高価なバルク体の使用数を抑えつつ、免震対象物を十分に浮上支承させるための浮上力を確保することが必要となる。しかし、一方向の磁束密度分布を一樣とし、バルク体に復元力が働かないことを利用して、水平方向の振動伝達を抑制しているため、永久磁石が発生する磁場のうち、一方向の磁場勾配を浮上力として活用することができない。また、実用化にあたっては、バルク体の冷却は冷凍機による伝導冷却が不可欠となり、バルク体は真空層を有する低温容器内に収納されることになる。このため、永久磁石レールから離れた位置において大きな浮上力を確保する必要がある。そこで、永久磁石の同極同士を対向させて磁束を寄せ集め、永久磁石レールから離れた位置での磁束密度を高める「Halbach 配列」を永久磁石レールとして採用することを提案し、永久磁石レールから離れた位置における浮上力を大幅に改善することに成功した。また、永久磁石レール面が鉛直方向と平行になる様に配置する「ラジアル型」を考案し、免震対象物の重量に関わらずに動作ギャップ（バルク体と永久磁石レールの距離）を一定に保つこと、ならびに、免震装置の設置面積を有効に活用することを可能にした。そして、効率的に浮上力を得るのに適したバルク体形状や大きさについて検討し、ラジアル型 Halbach 配列における中央部の磁束密度勾配が同符号で最大となる領域に直方体のバルク体を永久磁石レール長手方向に隙間なく配置することで、磁束密度の大きさおよび磁束密度勾配を有効に利用することができることを明らかにした。また、バルク体の厚さを厚くするよりも、薄いバルク体を永久磁石レール長手方向に並べて使用の方が、効果的に浮上力が得られることを明らかにした。一方、Halbach 配列を構成する永久磁石については、動作ギャップ 5 mm 時には永久磁石の厚さを厚くするよりも、永久磁石レール数を増加させた方が効率的に浮上力を得ることができ、永久磁石の幅とバルク体の幅の比を 2:3 にすることで、大きな磁束密度と磁束密度勾配が得られることを見出した。さらに、浮上力向上のために、永久磁石同士の反発力を浮上力として利用し、浮上層の安定性をバルク体と永久磁石レール間の復元力で確保するハイブリッドシステムを提案し、浮上層の安定性を確保しつつ非常に大きな浮上力を得ることができ、バルク体数を削減できることを示した。

また、超電導免震装置は免震対象物への振動伝達を除去するために永久磁石レールの長手方向における剛性を持たせない特長を有しているが、その反面、平常時（静止時）における制動力がないために、擾乱や地盤の傾斜により、浮上層の静止安定浮上を継続できなくなる場合がある。このため、浮上層の静止安定浮上を実現するに

は、平常時に剛性（制動力）を確保することが必要となるが、この場合、その剛性によって浮上層へ振動が伝達してしまうことが予想される。このように、平常時には剛性を持たせて浮上層の静止安定浮上を可能とし、振動時には剛性を無くして浮上層への振動を伝達させないという、相反する要求を満足する制動機構を確立する必要がある。そこで、平常時に静止安定浮上を実現するために、永久磁石間の吸引力を利用した「PM-PM システム」を考案した。PM-PM システムはパッシブ制御によって永久磁石レール長手方向に制動力が得られ、浮上層の静止安定浮上を可能とした。しかし、振動時においても PM-PM システムの永久磁石間の吸引力が働くため、浮上層への振動伝達率が増加するという問題が生じた。そこで、PM-PM システムの永久磁石間に銅板を挿入し、振動時の磁束変化を利用して銅板に渦電流を発生させることで、永久磁石間の磁束密度を小さくし、振動時における PM-PM システムの永久磁石間の吸引力を低減させることに成功した。さらに、銅板に発生する渦電流を利用した制動機構（振動吸収システム）を考案し、浮上層への伝達エネルギーを非接触で消費させることに成功した。

浮上力特性および制動特性に基づいて作製したモデル装置を図 2 に示す。モデル装置に水平方向振動を印加した場合の振動伝達特性および振動伝達抑制方法を明確にした。初期微動や微振動にあたる小振幅高周波振動に対しては、永久磁石の磁束変化を利用して銅板内に渦電流を発生させることで、静止安定浮上用の PM-PM システム間の磁気結合を抑制し、振動時における浮上層への力の伝達を抑えることに成功した。また、振動吸収システムの導入により、浮上層の動きを抑制し、変位を小さくできること、ならびに、振動後に大きな減衰効果が得られることを明らかにした。主要動にあたる大振幅低周波振動に対しては、浮上層が地上層の初期振動に追随するものの、地上層と浮上層の相対変位が大きくなるにつれ、PM-PM システム間の吸引力が小さくなり、一方向に等速度運動することを明らかにした。これより、振動時における固有周波数が存在せず、任意の周波数の水平方向振動に対して振動伝達率が 1 以下となるという既存の免震装置では実現できなかった免震効果を得ることに成功した。さらに、浮上層の一方向への等速度運動を抑制するために、PM-PM システムにおける浮上側の永久磁石を複数個設置した改良型 PM-PM システムを考案した。改良型 PM-PM システムを搭載したモデル装置に大振幅低周波振動を印加した際の変位波形と入力加速度に対する応答加速度（振動伝達率特性）を図 3 に示す。改良型 PM-PM システムを用いることで、相対変位に応じて吸引力の作用点を隣接する永久磁石に移行させ、地上層の変位に対して吸引力の向きを反転させることができ、一方向に動き続ける浮上層の変位を抑制することに成功した。また、改良型 PM-PM システムが水平方向振動の振動伝達率の増加に寄与せず、地上層の永久磁石と近傍する浮上層の永久磁石との吸引力によって、振動印加後における静止安定浮上の実現を可能にした。

地震動は水平成分のみならず、鉛直成分も含まれる。超電導免震装置は鉛直振動に対しては磁気結合により固有周期を持つため、共振現象を招く恐れがある。そこで、鉛直振動に対する共振時の振幅増加の抑制方法を検討した。超電導免震装置ではバルク体数を増加させることにより水平方向の磁気剛性を高めることなく、鉛直方向のみに磁気剛性を高めることができる。このため、バルク体数の増加により鉛直方向の磁気剛性を高めることで

応答変位を抑え、また、鉛直振動に対する固有周波数を高周波数側に移行させることで、地震動の周波数領域における共振現象の振幅増加を抑制することに成功した。さらに、バルク体数を増加させずに共振時の振幅増加を抑制するために、永久磁石レールに銅板を対向させた渦電流ダンパーを考案した。この渦電流ダンパーの銅板内に発生する渦電流によって、浮上層の振動を抑制するとともに、共振時の振幅増加を抑制することに成功した。また、鉛直振動の固有周波数をより高周波側へ移行させることにより、銅板内に発生する渦電流量が増加し、鉛直振動の共振時における振幅増加を効果的に抑制できることを示した。以上より、水平方向の振動伝達に寄与することなく、鉛直方向の振動減衰を可能とする超電導免震装置に適した鉛直方向の振動伝達抑制技術を確立した。

以上、本論文では、超電導バルク体を用いた磁気浮上型免震装置の浮上特性と振動伝達特性等の基礎特性を明確にするとともに、いかなる水平方向振動に対して共振現象を伴わない、すなわち、全周波数領域に対して振動伝達率が1を超えない、これまでにない免震原理を有する新たな免震装置の基盤技術を確立することができた。

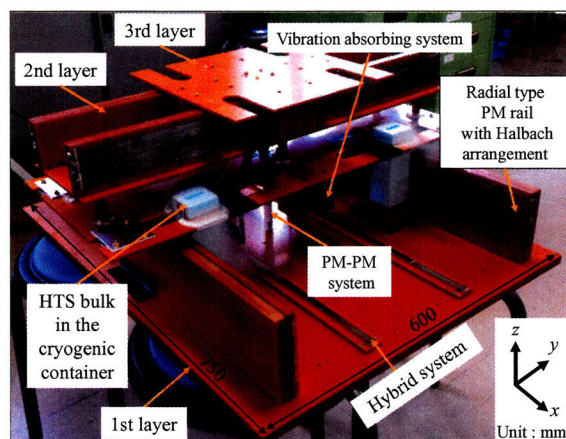


図2 超電導免震モデル装置  
Fig.2. Superconducting seismic isolation model device.

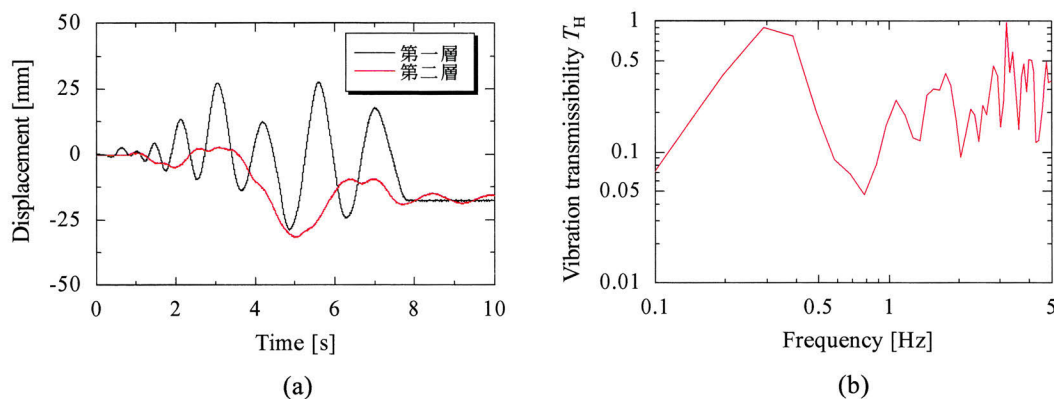


図3 大振幅低周波水平振動印加時における変位波形および振動伝達率  
Fig.3. Vibration waveform and vibration transmissibility against the large amplitude and low frequency vibration in the superconducting seismic isolation model device with new PM-PM system.



# 論文審査結果の要旨

日本は地震大国であり、大地震への対応が不可欠となる。これまでに、耐震・免震など多くの地震対策技術の研究・開発が進められているが、既存の免震装置では支承と減衰という相互干渉のある2つの要素をうまくバランスさせる必要があることから、免震対象物の固有周期の長周期化が困難であるなど、多くの課題が未解決のままとなっている。本論文は、超電導体固有の電磁特性であるピン止め効果を利用した、超電導バルク体と永久磁石レールで構成される磁気浮上型免震機構に関する基礎特性について研究した成果をまとめたもので、全編8章からなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、超電導バルク体と永久磁石レールで構成される磁気浮上型の免震理論について述べ、その実用化には、免震対象物を浮上支承するための浮上力確保、ならびに免震対象物への擾乱に対し静止安定浮上を可能とする制動技術の確立が重要な課題となることを明らかにしている。

第3章では、超電導バルク体と永久磁石レール間に働く電磁力特性と、効率的に浮上力が得られる超電導バルク体と永久磁石レールの構成方法について述べている。永久磁石レールから離れた位置で大きな浮上力を得るには、大きな磁束密度と磁束密度勾配が得られるハルバッハ配列を有するラジアル型永久磁石レールの採用が有効であることを明らかにした。また、超電導体のピン止め効果に起因する復元力を活用することで、浮上安定性を損ねることなく永久磁石間の反発力を浮上力として活用できることを明確にした。これらは、超電導バルク体と永久磁石で構成される磁気浮上システムの浮上力を改善する上で大変有用な成果である。

第4章では、平常時における浮上層の静止安定浮上を実現する制動機構について述べている。平常時の静止安定浮上と振動時の振動伝達抑制という2つの相反する条件を満足するために、永久磁石と銅板で構成された制動システムを提案し、モデル装置を用いて、提案する制動システムの有効性を明らかにした。

第5章では、第3章で提案したハルバッハ配列を有するラジアル型永久磁石レールと、第4章で提案した制動システムを用いた磁気浮上型免震モデル装置における、水平振動印加時の振動伝達特性について述べている。初期微動に相当する小振幅高周波振動、ならびに主要動に相当する大振幅低周波振動に対し、振動伝達率が1より小さくなること、ならびに静止時の浮上安定性を確保できることを実証した。これは、実用上、極めて重要な成果である。

第6章では、磁気浮上型免震モデル装置における、鉛直方向振動に対する振動伝達特性について述べている。鉛直方向には重力が存在することから、振動伝達を無くすことは不可能であり、免震対象物の固有周波数領域での振動増幅を可能な限り抑制することが重要となる。そこで、ハルバッハ配列を有するラジアル型永久磁石レールの高磁束密度勾配を利用した渦電流ダンパーを提案し、水平方向振動伝達特性に影響を及ぼすことなく、鉛直振動の固有周波数領域での振動増幅を抑制することに成功した。

第7章では、第3章から第6章までに得られた成果に基づき、実規模の磁気浮上型免震装置を設計した結果について述べている。免震装置の高浮上力化ならびに小型化には、浮上層の永久磁石使用量削減が有効であることを明らかにした。これは、磁気浮上型免震装置の設計上、有益な成果である。

第8章は結言であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、超電導体固有の電磁特性を活用することで、振動時における地上層と浮上層間の磁氣的結合を排除し、任意の水平振動に対して共振現象を伴わない、これまでに無い免震原理に基づく磁気浮上型免震装置が可能となることを、理論的ならびに実験的に示したものであり、超電導工学、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。